

浅谈温度对静态破碎应力应变的影响

南朋飞

中交中南工程局有限公司 湖南 长沙 410000

摘要: 静态破碎工作原理是在物体中打孔, 放入无声破碎剂后, 水化反应, 形成结晶, 从而对孔壁施加压缩应力, 当垂直方向的张拉应力超过混凝土或者岩石的抗拉强度时, 物体将发生龟裂。本文在实验测得静态破碎剂产生的膨胀力与温度的基础上, 将静态破碎过程中的岩石等效为一个受随时间变化的膨胀力和温度作用的厚壁圆筒, 并运用有限元软件ABAQUS进行数值模拟, 通过观察厚壁圆筒的应力、应变变化, 得出温度岩石破碎对于静态破碎施工的影响。研究表明: 温度加速了静态破碎的进程。在静态破碎初始阶段, 离孔比较近的区域内, 温度影响很大, 在后期离孔较远处, 温度对混凝土应力应变几乎没有影响。

关键词: 静态破碎; ABAQUS; 数值模拟; 膨胀力; 耦合

Influence of temperature on static crushing stress and strain

Nan Pengfei

China Communications Zhongnan Engineering Bureau Co., LTD., Changsha, Hunan province 410000

Abstract: The working principle of static crushing is to punch holes in the object, put the silent crushing agent, hydration reaction, forming crystallization, so as to apply compression stress to the hole wall, When the tensile stress of the vertical direction exceeds the tensile strength of concrete or rock, the object will crack. In this paper, on the basis of the expansion force and temperature produced by static crushing agent, the rock in static crushing process is equivalent to a thick-wall cylinder affected by the expansion force and temperature over time, and use the finite element software ABAQUS for numerical simulation, by observing the stress of thick-wall cylinder, the temperature rock crushing on the influence of static crushing construction. The study shows that the temperature accelerates the process of static fragmentation. In the initial stage of static crushing, in the area close to the hole, the temperature has a great influence. In the later stage, far away from the hole, the temperature has little effect on the stress and strain of concrete.

Key words: static crushing; ABAQUS; numerical simulation; expansion force; coupling

1 引言

1.1 研究意义

广连高速公路黎溪北互通L匝道最大坡高50.62m, 主要为强、中风化砂岩, 岩质较硬, 需采用爆破进行施工, 但该边坡位于匝道与S253平交处, S253省道为清远至英德的生命线, 交通压力较大, 且靠近京广铁路, 不能实现大规模的火工品爆破开挖, 局部地方需用到静态破碎工艺施工。

2 膨胀力与温度耦合作用下岩石爆破机理分析

2.1 静态膨胀剂的特性

静态破碎剂是一种无毒, 不燃, 不爆的物体。随着静态

破碎技术的广泛应用, 人们与进行了各种实验, 研制各种破碎剂。其中主要有复合型破碎剂和水泥膨胀破碎剂。复合型破碎剂是人们把石灰石煅烧成生石灰, 再与赤泥, 硫铝酸钙或石膏, 水泥等制成。这种复合型破碎剂的生产工艺简单, 早期膨胀很大, 效率高。但是其后劲不足, 容易喷口, 质量不稳定。我国和日本都是生产水泥膨胀破碎剂的。因为水泥膨胀破碎剂能够很好的解决复合型破碎剂的大多缺点。其主要原因是水泥膨胀破碎剂中f-CaO占矿物组成的70%-80%, f-CaO含量越高, 破碎剂的破碎威力就越大。表2.1是水泥膨胀破碎剂的组成:

表2.1 水泥膨胀破碎剂的组成

熟料种类	化学成分 (%)					矿物组成 (%)		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	C ₃ S+C ₂ S	C ₄ AF	f-CaO
破碎剂熟料	4-8	1-3	1-3	80-90	0.5-1	15-20	2-7	70-80

2.2 基于厚壁圆筒理论的膨胀力发展规律

金宗哲博士等通过实验结果提出膨胀压作用下岩石的

劈裂过程分为三个阶段:微裂阶段, 膨胀压的传递阶段, 断裂阶段。

本文主要研究第一阶段, 即微裂阶段, 这一阶段开始时应力是线性的, 之后是非线性的, 符合弹性规律。这时孔周围的介质可看作厚壁圆筒, 本文采用孔直径为60mm, 长500mm, 筒体外直径300mm, 长600mm的C30混凝土模拟硬质岩。弹性模量30GPa, 泊松比0.2。内压与温度耦合作用下厚壁圆筒的应力:

轴向:

$$\sigma_{\theta} = (\sigma_{\theta})_F + (\sigma_{\theta})_T = \frac{P}{K^2 - 1}(1 + K_r^2) - \frac{E\alpha_c \Delta t}{10(1 - \mu)} \left(\frac{1 - \ln K_r}{\ln K} - \frac{K_r^2 + 1}{K^2 - 1} \right) + 1 \quad (2.1)$$

径向:

$$\sigma_r = (\sigma_r)_F + (\sigma_r)_T = \frac{P}{K^2 - 1}(1 - K_r^2) + \frac{E\alpha_c \Delta t}{2(1 - \mu)} \left(-\frac{\ln K_r}{\ln K} + \frac{K_r^2 - 1}{K^2 - 1} \right) \quad (2.2)$$

轴向:

$$\sigma_z = (\sigma_z)_F + (\sigma_z)_T = 0 \quad (2.3)$$

单元体任意截面处的应力:

$$\sigma_{\alpha} = (\sigma_{\alpha})_F + (\sigma_{\alpha})_T = \frac{P}{K^2 - 1} + \frac{E\alpha_c \Delta t}{4(1 - \mu)} \frac{1 - 2 \ln K_r}{\ln K} + \left(\frac{E\alpha_c \Delta t}{4(1 - \mu)} \left(2 \frac{K_r^2 - 1}{K^2 - 1} - \frac{1}{\ln K} \right) - \frac{PK_r^2}{K^2 - 1} \right) \cos(2\theta + 2\alpha) \quad (2.4)$$

$$\tau_{\alpha} = (\tau_{\alpha})_F + (\tau_{\alpha})_T = \left(-\frac{PK_r^2}{K^2 - 1} + \frac{E\alpha_c \Delta t}{4(1 - \mu)} \left(2 \frac{K_r^2 - 1}{K^2 - 1} - \frac{1}{\ln K} \right) \right) \sin(2\theta + 2\alpha) \quad (2.5)$$

式中: E ——弹性模量

μ ——泊松比

P ——内压

R ——筒体外半径

K ——筒体外半径与内半径之比

K_r ——筒体外半径与任意半径之比

Δt ——筒体内、外壁的温度差

α_c ——热膨胀系数

算例: 124min时孔内膨胀压 P 为39.462MPa, 温度为71.4℃, 环境温度为27.3℃。则此时, 膨胀压与温度耦合作用下, 可由公式2.1, 算得厚壁圆筒周向应力如图2.1所示。

同时在实验室使用C30混凝土制作同尺寸试块进行实体试验, 在静态膨胀剂作用下, 圆柱形混凝土试件的破裂形态

如图2.2所示。

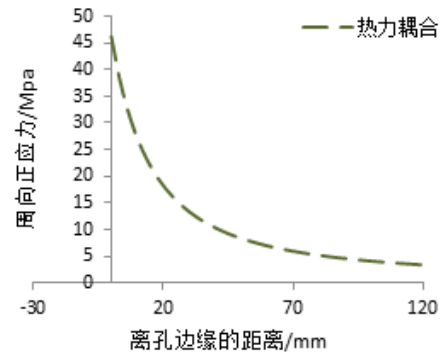


图2.1 周向应力



图2.2 混凝土破坏

3.3 ABQUAS数值模拟分析研究

3.3.1 模型建立

本文用ABAQUS计算静态破碎剂水化过程中混凝土C30的应力分布情况来研究岩石的爆破机理。

本文基于静态膨胀剂膨胀压试验, 建立一个厚壁圆筒模型, 建模过程如下: 首先建一个高600mm, 直径300mm的三维实体大圆柱和一个高500mm, 直径60mm的三维实体小圆柱, 再通过布尔操作让大圆柱体减去小圆柱体。之所以采用布尔操作, 是因为可以直接对合并后的部件定义一次材料属性, 也不用为相交区域再定义绑定约束。

对于混凝土的边界条件, 考虑到试验时直接将器材置于地上, 器材无法上下移动, 但水平方向无限制。如果定义底面 z 方向位移为0, 则约束力度不够, 若将底面自由度完全限制, 即固定支座, 那么约束力度太强。所以选择将底面四个周边的自由度完全限制^[2]。

在模型建立过程中, 选择什么样的本构关系对最终的计算结果的准确性有着很大的影响。本文采用线弹性本构关系。线弹性本构关系指遵循胡克定律, 应力-应变是线性的, 即 $\sigma = E\varepsilon$

混凝土的材料属性: 弹性 (Elastic): 泊松比

(Poisson's Ratio) 为0.2; 杨氏模量 (Young's Modulus) 为30GPa; 膨胀: 热膨胀系数(Expansion Coeffalpha)为 $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$; 热传导率(Conductivity)为 $1.28\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

网格划分是分析过程中一个极为重要的步骤, 划分网格的质量与数目影响计算规模的大小及计算结果的精度。对于三维模型, 有六面体(Hex), 六面体为主, 过渡区域为楔形(Hex-dominated), 四面体(Tet), 楔形(Wedge)四个可选择的单元形状。网格划分技术有四种: 结构化, 扫掠网格, 自由, 自底向上。一般模型结构比较复杂时, 模型会呈现出橙色, 表明无法使用目前赋予它的网格划分技术来生成网格, 这时可以利用Partition把复杂区域分割成几个形状简单的区域, 再进行网格划分。本文在给模型单元定义为六面体时, 模型出现橙色, 这是因为ABAQUS无法自动给圆孔没有贯穿的模型底部划分网格。

3.3.2 分析步骤与加载方法

表3.1 膨胀压与温度的值

时间/min	0	20	40	60	80	82	86	100	124
膨胀压/MPa	0	0.469	1.119	1.594	3.225	3.438	4.457	13.388	39.462
温度/ $^{\circ}\text{C}$	27.3	28	28.9	33.7	51.2	102.4	145.3	110.8	71.4

加载应同时施加均布压力和温度场。使膨胀力和温度共同作用, 探究膨胀力作用下混凝土应力应变发展规律时, 是选择均布荷载(Pressure), 通过Tabular幅值曲线在孔侧面来施加随时间变化的膨胀力; 探究温度作用下混凝土应力应变变化规律时, 则定义预定义场, 同样通过Tabular幅值曲线给孔侧面施加随时间变化的温度场。

3.3.3 膨胀力与温度耦合作用下混凝土应力应变发展规律

(1) 应力发展规律

混凝土的最大主应力在孔圆周处达到最大, 为43.49MPa, 略大于此时静态破碎剂产生的膨胀压39.462MPa, 由此可知温度对混凝土应力产生了影响。最大主应力沿路径的变化趋势为离孔越远, 应力越小, 直至减小到混凝土边缘处的3MPa。此时任意位置的最大主应力都大于混凝土抗拉强度, 表明此时混凝土已经完全破坏。

混凝土在75min左右, 最大主应力达到了混凝土的抗拉强度2.01MPa, 说明此时混凝土开始开裂。之后混凝土应力随时间快速增加, 表明混凝土开裂进程也将加快。在荷载作用起初, 同一时间, 最大主应力的最值在离孔圆周约20mm位置处, 孔圆周处的最大主应力比较小, 在超过20mm时, 应力随距离的增大而减小; 约在90min后, 混凝土上各点, 离孔越远, 应力越小。这表明, 在静态破碎初时, 温度的影响是很大的, 不可轻易忽略。因此, 在离孔比较近的区域内,

初始分析步initial是ABAQUS/CAE自动创建的。在初始分析步之后能给模型创建其它的一个或者多个分析步, 以此来定义模型的加载过程。本文创建了一个静力分析步, 定义的时间步长为124分钟, 初始增量步为15, 最大增量步为15, 最小增量步为0.00124, 最大增量步数为默认的100。一般情况下, 增量步的步数都不会超过100。

本文中膨胀压与温度都是随时间变化的, 在ABAQUS中可以通过幅值曲线来定义荷载和边界条件等参数随频率或时间的变化。常用的幅值曲线有4种类型: 1) Equally spaced: 等间距型幅值曲线; 2) Periodic: 周期型幅值曲线; 3) Ramp: 默认的线性过度幅值曲线; 4) Tabular: 表格型幅值曲线。本文选用的就是Tabular(表格型幅值曲线)膨胀力定义了9对数据, 温度场定义了9对数据。数据如下表3.1所示。定义数据后, ABAQUS会自动在各个点之间进行线性插值, 所以在温度和膨胀压变化较大的时间段内需要多定义几个时间点。

随着时间的增加, 各点的应力先增加, 再急剧减小, 之后继续增加, 可以看出, 急剧减小的时间段正是温度达到最大时, 而在离孔较远的区域内, 各点的应力持续增加。由此表明, 温度对离孔很近的区域的混凝土应力影响较大, 而对离孔较远处的混凝土没有太大影响。

4 结语

4.1 静态破碎大约在70min左右开始开裂, 裂缝向四周扩散。随着混凝土内膨胀力的快速增加, 应力应变也随之快速增大, 这也表明了, 混凝土在70min之后会加快开裂的进程, 直至110min左右, 混凝土完全开裂。

4.2 研究表明: 在静态破碎初始阶段, 离孔比较近的区域内, 温度的影响很大, 混凝土实际应力应变大多来自于温度变化产生的温度应力。随着静态破碎进程的开展, 温度的影响越来越小。尤其是在静态破碎后期, 离孔较远处, 温度对混凝土应力应变几乎没有影响。

参考文献

- [1] 张爱莉, 姚刚. 静态破碎的设计及应用[J]. 建筑技术, 2002, 33(6): 420-422
- [2] 石思, 邹雪晴. 静态破碎在危岩崩塌防治中的应用[J]. 人民长江, 2017, 48(1): 202-204
- [3] 解北京, 严正, 赵泽明. 基于物理降温静态破碎防喷孔实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(01): 150-154